**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ**

**Содержание**

. Экспериментальное получение электромагнитных волн

. Плоская электромагнитная волна. Волновое уравнение для электромагнитного поля

. Энергия электромагнитных волн

. Давление электромагнитных волн

. **Экспериментальное получение электромагнитных волн**

Существование электромагнитных волн было предсказано английским физиком М.Фарадеем в 1832году. Из уравнений Максвелла, сформулированных им в 1865 году, вытекает, что переменные электромагнитные поля распространяются в пространстве со скоростью света. Решающее значение для подтверждения максвелловской теории сыграли опыты немецкого физика Г. Герца (1888г.), в которых было показано, что электрические и магнитные поля действительно распространяются в виде волн, свойства которых описываются уравнениями Максвелла. Уравнения Максвелла позволили установить, что электромагнитные радиоволны, оптическое, рентгеновское и гамма-излучения представляют собой электромагнитные волны с различной длиной волны.

Если где-то в пространстве существуют изменяющиеся со временем электрические заряды и токи, то они будут излучать электромагнитные волны, распространяющиеся в окружающей среде. Источником электромагнитных волн, например, может служить любой электрический колебательный контур или проводник, по которому течет переменный электрический ток, так как для возбуждения электромагнитных волн необходимо создать в пространстве переменные электрическое и магнитное поля.

В рассмотренной ранее лекции колебательном LC- контуре электрическое и магнитное поля сосредоточены между обкладками конденсатора и внутри катушки индуктивности. Такой контур слабо излучает энергию в окружающее пространство и является в этом смысле **закрытым колебательным контуром.** Излучающая способность такого контура мала и он непригоден для получения электромагнитных волн. В 1886 году Г. Герц использовал для получения электромагнитных волн **открытый колебательный контур**, в котором он уменьшил число витков катушки и площадь пластин конденсатора, а также раздвинул их и таким образом совершил переход от закрытого колебательного контура к открытому колебательному контуру (**вибратор Герца**), представляющему собой два стержня, разделенных искровым промежутком. При подаче на вибратор высокого напряжения в промежутке между стержнями проскакивала искра. Она закорачивала промежуток, и в вибраторе возникали затухающие электрические колебания. За время горения искры успевало совершаться большое число колебаний. Если в закрытом колебательном контуре переменное электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора пространство, вследствие чего существенно повышается интенсивность электромагнитного излучения. Излучаемые электромагнитные волны, распространяясь в пространстве, переносят энергию, поэтому запасенная в вибраторе энергия с течением времени уменьшается. Пополняется энергия вибратора за счет источника э.д.с., подключаемого к обкладкам конденсатора, а искровой промежуток применяется для того, чтобы увеличить разность потенциалов, до которой первоначально заряжаются обкладки. Помимо электрического поля, в пространстве вокруг вибратора создается вихревое магнитное поле, причем как показали исследования, в каждой точке пространства векторы **Е** и **Н** взаимно перпендикулярны, а их значения зависят от координат и времени. Для регистрации электромагнитных волн Г. Герц использовал второй подобный вибратор, называемый **резонатором**, имеющий такую же частоту собственных колебаний, что и излучающий вибратор, т.е. настроенный в резонанс с вибратором. Когда электромагнитные волны достигали резонатора, то в его зазоре проскакивала электрическая искра.

Г. Герц, используя описанный вибратор, получил электромагнитные волны длиной от 0,6 м до 10 м. С помощью больших металлических зеркал и асфальтовой призмы (размером более 1 м и массой 1200 кг) Герц осуществил **отражение и преломление электромагнитных волн.** Он обнаружил, что оба эти явления подчиняются законам, установленным ранее в оптике для световых волн. Отразив бегущую плоскую волну с помощью металлического зеркала в обратном направлении, Герц получил **стоячую волну** и, измерив расстояние между узлами и пучностями, определил длину волны λ. Умножив λ на частоту колебаний вибратора ν, определил **скорость распространения электромагнитных волн**, которая оказалась к близкой скорости света С. Используя решетку из параллельных друг другу медных проволок расположенных на пути распространения электромагнитных волн Г. Герц доказал **поперечность** электромагнитных волн.

Опыты Г. Герца были продолжены русским ученым П.Н. Лебедевым, который в 1894 году применил миниатюрный вибратор из тонких платиновых стерженьков и получил более короткие электромагнитные волны с λ = 4 - 6 мм и исследовал прохождение их в кристаллах. При этом было обнаружено двойное преломление волн (двойное лучепреломление).

В 1896 году русский ученый А.С. Попов впервые осуществил с помощью электромагнитных волн передачу сообщения на расстояние около 250 м (были переданы слова «Генрих Герц»). Тем самым было положено основание радиотехнике.

Недостатком вибраторов Герца и Лебедева являлось то, что свободные колебания в них быстро затухали и обладали малой мощностью. Для получения незатухающих колебаний необходимо создать автоколебательную систему, которая обеспечивала бы подачу энергии с частотой, равной частоте собственных колебаний контура. Для этого используют ламповые или транзисторные генераторы.

Простейшим излучателем электромагнитной волны является электрический диполь, представляющий собой отрезок проводника длиной l <<λ, по которому протекает электрический ток I = I0sinωt. На расстояниях r>>λ от электрического диполя, в так называемой волновой зоне, электромагнитные поля «отпочковавшиеся» от диполя никак с ним не связаны и свободно распространяются в пространстве. В однородной изотропной среде они образуют сферическую волну.

Помимо радиотехники электромагнитные волны широко используются в радиолокации для обнаружения и определения положения самолетов, ракет, кораблей, наблюдения за образованием и движением облаков, изучения движения планет и метеоритов и т.д. Электромагнитные волны используются в радиогеодезии для точного определения расстояний между объектами и положение объекта на местности (система ГЛОНАСС). В радиоастрономии электромагнитные волны используются для исследования радиоизлучения небесных объектов. Практически нет таких областей науки и техники, где бы не использовались электромагнитные волны.

**2. Плоская электромагнитная волна. Волновое уравнение для электромагнитного поля**

На расстоянии r>>λ от электрического диполя или вибратора (волновая зона) электрическое и магнитное поля изменяются в фазе по гармоническому закону и представляют собой сферическую электромагнитную волну, распространяющуюся с фазовой скоростью

V = 1/√ε0εμ0μ = С/√εμ,

где С = 1/√ ε0μ0 - скорость света в вакууме, ε и μ - диэлектрическая и магнитная проницаемость среды. Так как εμ>1, то скорость распространения электромагнитных волн в веществе всегда меньше, чем в вакууме. При наличии дисперсии среды (зависимости скорости распространения электромагнитных волн от их частоты) скорость переноса энергии, характеризуемая групповой скоростью Vгр, может отличаться от V. В анизотропных средах V зависит также от направления распространения волны.

С дальнейшим увеличением расстояния от вибратора радиус кривизны фронта сферической волны увеличивается, и ее можно считать плоской. Можно показать, что для однородной незаряженной непроводящей (плотность тока j=0) несегнетоэлектрической (ε = const) и неферромагнитной среды (μ = const) из уравнений Максвелла следует, что векторы напряженности **Е** и **Н** переменного электромагнитного поля удовлетворяют волновому уравнению:

Δ**E** = (1/V2)∂2**E**/∂t2,(1)

Δ**H** = (1/V2)∂2**H**/∂t2,(2)

где Δ = ∂2/∂x2 + ∂2/∂y2 + ∂2/∂z2 - оператор Лапласа.

Следствием теории Максвелла является **поперечность электромагнитных волн:** векторы **Е** и **Н** напряженностей электрического и магнитного полей волны взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору **V** скорости распространения волны, причем векторы **Е**, **Н** и **V** образуют правовинтовую систему. Уравнениям (1) и (2) удовлетворяют плоские монохроматические электромагнитные волны, описываемые уравнениями

Еy = E0cos(ωt - kx + φ),(3)

Hz = H0cos(ωt - kx + φ),(4)

где k = ω/V - волновое число.

Векторы **Е** и **Н** всегда колеблются в одинаковых фазах, поэтому в уравнениях (3) и (4) начальные фазы φ колебаний в точках с координатой х = 0 одинаковы.

Между амплитудными Е0 и Н0 и мгновенными значениями Е и Н в плоской электромагнитной волне существует взаимосвязь:

Е√ε0ε = Н√μ0μ; Е0 √ε0ε = Н0 √μ0μ.(5)

**3. Энергия электромагнитных волн**

Электромагнитные волны переносят энергию. В изотропной среде, не обладающей ферромагнитными и сегнетоэлектрическими свойствами, о**бъемная плотность энергии** электромагнитного поля W складывается из объемных плотностей Wэл и Wм электрического и магнитных полей:

W = Wэл + Wм = ε0εE2/2 + μ0μH2/2. (6)

Усредненные по времени плотности энергии электрического и магнитного полей одинаковы, т.е. Wэл = Wм. Поэтому можно написать, что

W = Wэл + Wм = ε0εE2 = √ε0μ0√εμ ЕН. (7)

Полную энергию электромагнитного поля W можно определить, вычислив интеграл по объему V, в котором характеристики электрического и магнитного полей отличны от нуля

W = ∫( Wэл + Wм ) dV.

Умножив плотность энергии W на скорость V распространения волны в среде, получим **модуль вектора плотности потока энергии** S, где **S** - векторная величина, равная энергии, переносимой электромагнитной волной в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению переноса.

= WV = EH. (8)

Так как векторы **Е** и **Н** взаимно перпендикулярны и образуют с направлением распространения волны правовинтовую систему, то направление вектора [**EH**]совпадает с направлением переноса энергии, а модуль этого вектора равен ЕН. Следовательно, вектор плотности потока электромагнитной энергии (вектор Умова- Пойтинга) можно представить как векторное произведение **Е** и **Н**:

**S = [EH].**

Поток Ф энергии, переносимой электромагнитной волной через некоторую поверхность F, можно найти с помощью интегрирования:

Ф = ∫**S** d**F.(9)**

 **F**

При распространении электромагнитной волны в средах с диссипацией энергии волна затухает, а ее энергия поглощается или рассеивается средой.

**4. Давление электромагнитных волн**

Гипотеза о существовании давления света впервые была высказана в 17 веке немецким ученым И. Кеплером для объяснения отклонения хвостов комет, пролетающих вблизи Солнца. Если электромагнитные волны поглощаются или отражаются телами, что было подтверждено Г. Герцем, то из теории Максвелла следует, что электромагнитные волны сообщают телу некоторый импульс, т.е. должны оказывать на тела давление. Однако значение этого давления ничтожно мало даже для самых сильных источников света, таких как Солнце.

При падении электромагнитной волны на поверхность любой среды ее электрическая составляющая вызывает периодическое смещение электрических зарядов среды, образуется электрический ток, взаимодействие которого с магнитной составляющей волны приводит к появлению силы Ампера, направленной перпендикулярно поверхности среды. Усредненное по времени значение силы Ампера, действующей на единицу поверхности, дает давление плоской электромагнитной волны

Р = (1 - Т + R)I/C,

где I/C - отношение интенсивности света к его скорости, Т и R- коэффициенты пропускания и отражения света поверхностью среды.

Электромагнитному полю присущ механический импульс.

В случае поглощающей поверхности импульс электромагнитного поля

Р = W/С,

где W - энергия электромагнитного поля. Выражая импульс как Р = mC (поле в вакууме распространяется со скоростью С), получим

Р = mC = W/С, откуда

W = mC2, (10)

электромагнитный волна энергия давление

где m - масса поля. Так как скорость света С очень велика, то даже значительной энергии поля соответствует очень малая его масса.

Соотношение (10) между массой и энергией электромагнитного поля является универсальным законом природы.

Можно оценить, что при средней мощности солнечного излучения, приходящего на Землю, давление для абсолютно поглощающей поверхности составляет примерно 5 мкПа. В исключительно тонких экспериментах, ставших классическими, П.Н. Лебедев в 1899 г. доказал существование светового давления на твердые тела, а в 1910 г. - на газы. Результаты измерений оказались в полном согласии с теорией, что подтвердило выводы Максвелла о том, что свет представляет собой электромагнитные волны.

С развитием квантовых представлений об оптическом излучении давление электромагнитных волн получает простую интерпретацию. Оптическое излучение представляется как поток фотонов с энергией ε = hυ, скоростью С и импульсом hυ/С, где h - постоянная Планка. Если падающий на среду фотон поглощается, рассеивается или отражается частицами среды, то он передает свою энергию и импульс силы этим частицам. Передача импульса согласно 2-му закону Ньютона означает появление силы с неравной нулю составляющей, перпендикулярной поверхности среды, т.е. появление давления вследствие воздействия на поверхность среды оптического излучения. Импульс силы, сообщаемый единице поверхности в единицу времени, равен давлению Р на поверхность.